

4. Егоров А. В., Белогусев В. Н. Инерционный метод оценки мощности механических потерь в асинхронном зубчатом электроприводе // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 6. – С. 34–37.

5. Кацман М. М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электроприводу : учеб. для электротехни-

ческих специальностей техникумов. – М. : Академия, 2004. – 252 с.

6. ГОСТ 11828–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний [введ. 1987-01-07]. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 31 с.

A. V. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Volga State Technological University, Yoshkar Ola

K. E. Kozlov, Post-graduate, Volga State Technological University, Yoshkar Ola

Inertial Method of Estimating Energy Efficiency of Asynchronous Chain Electric Drive

The article suggests the methodology and theoretical justification for the inertial method for determining the energy characteristics of chain transmissions as part of a chain electric drive. Having equipped the drive with the hardware and software system, the developed technique allows measuring the moment of inertia of losses in chain transmissions within a wide range of speed, loaded and transient modes of electric drive operation.

Key words: inertia, inertial diagnostics, energy efficiency, chain transmissions.

УДК 621.03: 621.3.08

В. Е. Щавлев, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Д. Н. Трушников, кандидат технических наук, докторант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

А. А. Южаков, доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ВТОРИЧНОГО ТОКА В ПЛАЗМЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА*

Представлен анализ спектральных характеристик датчика-коллектора вторичного излучения в плазме, образующейся в зоне контакта электронного луча с изделием во время процесса электронно-лучевой сварки, разработана и проанализирована математическая модель датчика.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, математическая модель, ряд Фурье, вторично-эмиссионный ток в плазме.

По сравнению с обычными способами сварки (электродуговая, газопламенная, электрошлаковая), применяемыми при соединении материалов, электронно-лучевая сварка (ЭЛС) имеет ряд преимуществ: высокая концентрация мощности в электронном пучке, малые размеры зоны термического влияния, равнопрочность металла шва и основного материала и др. Эти преимущества обуславливают широкие технологические возможности электронного пучка для сварки химически активных, цветных и высокопрочных металлов, тугоплавких и жаропрочных сплавов, применяемых для изготовления ответственных изделий [1].

При решении вопросов оптимизации процесса ЭЛС одними из основных задач являются минимизация ширины сварного шва и обеспечение воспроизводимости глубины проплавления, что тесно связано с выбором и управлением режимом фокусировки [2]. Воспроизведение режима фокусировки электронного пучка является сложной задачей, так как фокусировка сварочного пучка неоднозначно связана с током фокусирующей линзы электронной пушки [3]. В то же время изменение тока фокуси-

ровки на 1 % может приводить к изменению глубины проплавления на 20 %.

Следовательно, ЭЛС предъявляет высокие требования к параметрам качества систем управления, поскольку любые малейшие отклонения или неучтенные задержки могут привести к дефектам, недопустимым при использовании способов соединения материалов данного класса точности.

Таким образом, перед исследователями встает целый комплекс взаимосвязанных задач:

1) поиск параметров процесса сварки, на основе анализа которых можно было бы построить контур управления;

2) поиск способа измерения, методов предварительной обработки информационных сигналов (фильтрация, усиление), характеризующих процесс формирования сварного шва;

3) поиск закона управления параметрами электронного луча для получения швов с заданными характеристиками.

В предложенной работе рассматривается решение первых двух задач. Известно, что существенное влияние на форму канала проплавления оказывает

© Щавлев В. Е., Трушников Д. Н., Южаков А. А., 2013

Получено 08.05.13

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ-Урал № 11-08-96016, РФФИ № 13-08-00397А и при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края.

положение зоны максимальной концентрации энергии луча относительно поверхности свариваемого изделия, так называемый фокус [4, 5]. Кроме того, для решения задач идентификации процесса взаимодействия электронного луча с материалом применяется осцилляция пучка по различным траекториям [6, 7]. Как указано в [7], наиболее эффективно варьирование положения фокуса в вертикальной плоскости. Подобные исследования уже имели место при анализе рентгеновского излучения [8, 9], однако в анализируемом случае исследуется влияние на вторично-эмиссионный сигнал тока в плазме [10, 11]. В результате в этом сигнале была выявлена закономерность, состоящая в том, что максимальное значение амплитуды колебаний высокочастотной составляющей тока (назовем эту величину «вторичным сигналом») соответствует режиму острой фокусировки, при котором достигается максимальная глубина канала проплавления. Кроме того, при отклонении тока фокусировки от данного значения уменьшается и амплитуда колебаний.

Указанное выше позволяет говорить об обнаружении параметра, подходящего для использования в качестве информационного в системе управления глубиной проплава, но предварительно необходимо проанализировать данный сигнал с точки зрения помехозащищенности и достоверности, а также пригодности использования его в составе подобной системы. Всесторонний анализ подразумевает наличие достоверной модели объекта [12, 13], поэтому одной из целей данной работы является построение математической модели датчика – регистратора вторичного излучения.

Датчик является коллектором вторичных электронов, который представляет собой металлический диск с отверстием, установленный на торце электронно-лучевой пушки на изоляторах, причем к датчику прикладывается напряжение положительной относительно свариваемого изделия полярности [14].

Разработка модели

Зависимость анализируемого параметра (амплитуда высокочастотных колебаний вторичного тока в плазме или вторичный сигнал) можно аппроксимировать функцией Гаусса (рис. 1):

$$I_k = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(I_\phi - I_{\phi_{ext}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где K – некоторый коэффициент пропорциональности; σ – среднее квадратическое отклонение вторичного сигнала; I_ϕ – ток фокусировки; $I_{\phi_{ext}}$ – значение тока фокусировки при максимальной глубине канала.

Наличие экстремума рассматриваемой функции позволяет применять специальные методы регулирования и идентификации [15]. Рассмотрим формирование вторичного сигнала при использовании метода синхронного детектирования [15]. Для реализации данного метода введем гармонические колебания тока фокусировки в соответствии с выражением

$$I_\phi = \langle I_\phi \rangle + I_{\phi m} \sin \omega \cdot t, \quad (2)$$

где $I_{\phi m}$ – максимальная амплитуда отклонения; $\langle I_\phi \rangle$ – среднее значение тока фокусировки; ω – частота колебаний; t – время.

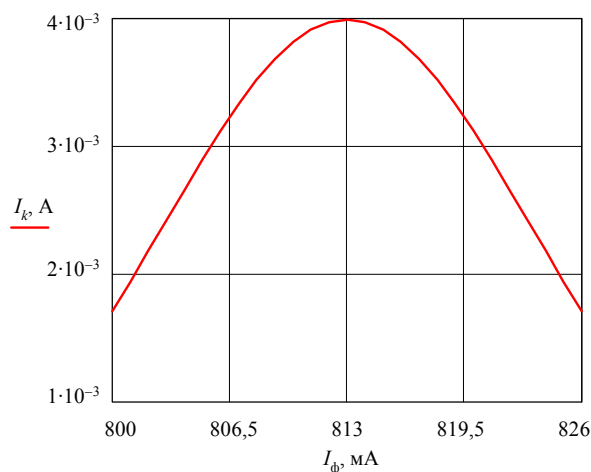


Рис. 1. Зависимость амплитуды высокочастотных колебаний вторичного тока в плазме от тока фокусирующей системы, аппроксимированная нормальной функцией (I_k – ток коллектора, мА; I_ϕ – ток фокусирующей системы, мА)

Формула (1) примет вид

$$I_k(\alpha) = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\langle I_\phi \rangle + I_{\phi m} \sin \alpha - I_{\phi_{ext}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где $\alpha = \omega t$.

Введем обозначение

$$\Delta I_\phi = \langle I_\phi \rangle - I_{\phi_{ext}}, \quad (4)$$

где ΔI_ϕ – режим фокусировки.

Тогда изменение вторичного сигнала во времени (2) можно представить в виде кратного ряда Фурье от одной переменной:

$$I_k(\alpha) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m e^{jm\alpha}, \quad (5)$$

где коэффициенты ряда определяются формулой

$$C_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) e^{-jm\alpha} d\alpha. \quad (6)$$

С учетом (4) получаем:

$$C_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta I_\phi + I_{\phi m} \sin \alpha)^2}{2\sigma^2}} \times e^{-jm\alpha} d\alpha. \quad (7)$$

Соотношения (5) и (7) представляют математическую модель датчика вторичного сигнала, как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодической составляющей в параметрах электронного пучка. Математическая модель позволяет выявить составляющие сигнала датчика с частотами $m\alpha$, где m – целое число.

В тригонометрической форме (5) будет иметь вид

$$I_k(\alpha) = \frac{d_0}{2} + 4 \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m \cos(m\alpha) + b_m \sin(m\alpha), \quad (8)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$d_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) d\alpha; \quad (9)$$

$$d_m = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \cos(m\alpha) d\alpha; \quad (10)$$

$$b_m = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \sin(m\alpha) d\alpha. \quad (11)$$

В этом случае

$$C_m = \frac{1}{2}(d_m - jb_m). \quad (12)$$

Таким образом, исследуемый сигнал можно представить суммой постоянной и гармонических составляющих. Если сканирование по ΔI_Φ отсутствует, то ряды вырождаются в соотношение (1).

Интерес представляет определение спектральных составляющих, зависящих от положения фокуса относительно поверхности свариваемого изделия. Для получения этих составляющих воспользуемся соотношением (1). Получение аналитического выражения интеграла, входящего в формулу, затруднено, поэтому представим подынтегральное выражение в виде ряда Тэйлора по степеням x , где $x = I_\Phi - I_{\Phi_{ext}}$:

$$f(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} = f(0) + f'(0)\frac{x}{1!} + f''(0)\frac{x^2}{2!} + \dots + f^{(n)}(0)\frac{x^n}{n!} + \dots \quad (13)$$

С достаточной для практики точностью можно ограничиться пятью членами ряда. Такое ограничение допустимо при $|x| < \sigma$ и характерно для описываемых процессов.

Тогда получим:

$$f(0) = 0, f'(0) = 0, f''(0) = -\frac{1}{\sigma^2}, f^{(3)}(0) = 0, f^{(4)}(0) = \frac{3}{\sigma^4}.$$

Отсюда:

$$e^{-\frac{(I_\Phi - I_{\Phi_{ext}})^2}{2\sigma^2}} = 1 - \frac{(I_\Phi - I_{\Phi_{ext}})^2}{2\sigma^2} + \frac{(I_\Phi - I_{\Phi_{ext}})^4}{8\sigma^4}; \quad (14)$$

с учетом выражений (3) и (4) получим:

$$I_k(\alpha) = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \left(1 - \frac{\Delta I_\Phi^2}{2\sigma^2} + \frac{\Delta I_\Phi^4}{8\sigma^4} + \left(\frac{\Delta I_\Phi^3 I_{\Phi m}}{2\sigma^4} - \frac{\Delta I_\Phi I_{\Phi m}}{\sigma^2} \right) \sin \alpha + \left(\frac{3\Delta I_\Phi^2 I_{\Phi m}^2}{4\sigma^4} - \frac{I_{\Phi m}^2}{2\sigma^2} \right) \sin^2 \alpha + \frac{\Delta I_\Phi I_{\Phi m}^3}{2\sigma^4} \sin^3 \alpha + \frac{I_{\Phi m}^4}{8\sigma^4} \sin^4 \alpha \right). \quad (15)$$

Коэффициенты ряда Фурье определяются выражениями:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) d\alpha = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(2 - \frac{1}{2\sigma^2} I_{\Phi m}^2 + \frac{3}{32\sigma^4} I_{\Phi m}^4 - \frac{1}{\sigma^2} \Delta I_\Phi^2 + \frac{1}{4\sigma^4} \Delta I_\Phi^4 + \frac{3}{4\sigma^4} \Delta I_\Phi^2 I_{\Phi m}^2 \right); \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(\left(\frac{3}{8\sigma^4} I_{\Phi m}^3 - \frac{1}{\sigma^2} I_{\Phi m} \right) \Delta I_\Phi + \frac{1}{4\sigma^4} I_{\Phi m} \Delta I_\Phi^3 \right); \quad (17)$$

$$a_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \cos 2\alpha d\alpha = \frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{4\sigma^2} \Delta I_\Phi^2 - \frac{1}{16\sigma^4} \Delta I_\Phi^4 - \frac{3}{8\sigma^4} \Delta I_\Phi^2 I_{\Phi m}^2 \right); \quad (18)$$

$$b_3 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \sin 3\alpha d\alpha = -\frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{8\sigma^4} \Delta I_\Phi I_{\Phi m}^3; \quad (19)$$

$$a_4 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_k(\alpha) \cos 4\alpha d\alpha = -\frac{K}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{64\sigma^4} I_{\Phi m}^4, \quad (20)$$

где $\Delta I_\Phi = \langle I_\Phi \rangle - I_{\Phi_{ext}}$.

В итоге сигнал, представленный рядом Фурье, будет иметь вид

$$I_k = \frac{a_0}{2} + b_1 \sin \alpha + a_2 \cos 2\alpha + b_3 \sin 3\alpha + a_4 \cos 4\alpha, \quad (21)$$

где коэффициенты a_m, b_m определяются выражениями (16)–(20).

Анализ выражений (16)–(21) свидетельствует о том, что при осцилляции фокуса в спектре сигнала датчика присутствуют составляющие, амплитуды которых зависят от величины отклонения тока фокусировки от значения при максимальной глубине канала проплавления.

Анализ результатов

Спектральный состав сигнала датчика вторичных электронов при отклонении тока от точки с наибольшей глубиной шва (ΔI_Φ) на 5 мА и амплитудой сканирования ($I_{\Phi m}$) 3 мА изображен на рис. 2. Максимальную величину в этом режиме имеет первая гармоника.

На рис. 3 изображены зависимости нечетных и четных гармоник от режима фокусировки. Наиболее подходящей для контроля оптимального положения фокуса является первая гармоника, имеющая наибольшую амплитуду и однозначность фазы в зависимости от режима фокусировки. Третья гармоника, как и первая, однозначно характеризует знак конечного результата, но имеет очень малую амплитуду. Наличие экстремума кривой второй гармоники также представляет определенную ценность, поскольку использование ее в качестве информационного параметра позволяет применять экстремальный регулятор при поиске максимальной глубины проплава.

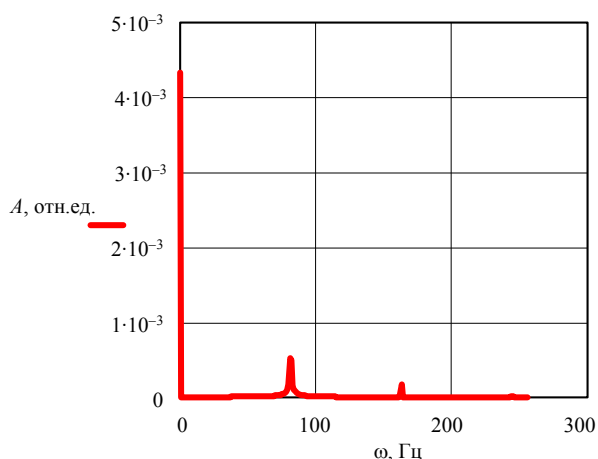


Рис. 2. Спектральный состав датчика вторичного сигнала при $I_{\text{фср}} = 5 \text{ мА}$, $I_{\text{фм}} = 3 \text{ мА}$

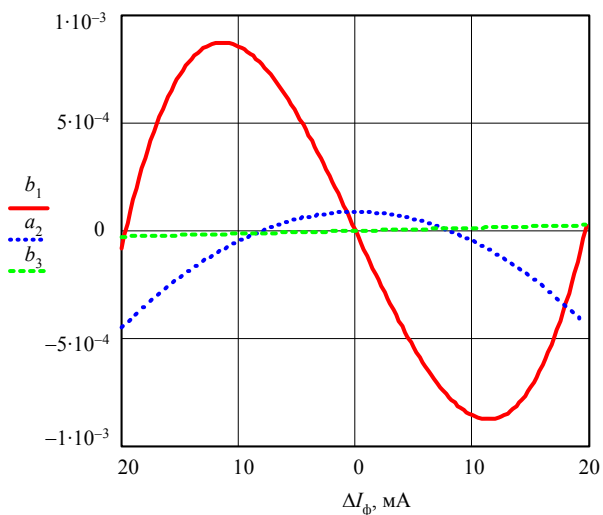


Рис. 3. Зависимость четных (a_2) и нечетных (b_1, b_2) гармоник от режима фокусировки

Выводы

Анализ разработанной математической модели позволяет сделать некоторые выводы об особенностях анализа вторичного сигнала при управлении процессом формирования сварного шва изменением положения фокуса пучка электронов.

1. Вторично-эмиссионное излучение является достаточно сложным по составу, обладает широким спектром, поэтому для выделения полезной информации требуется дополнительная обработка данного сигнала.

2. В ходе анализа частотных составляющих спектра сигнала амплитуды высокочастотных колебаний вторичного тока в плазме выявлены две гармоники (на частотах ω_1 и $2\omega_1$), зависимость значений которых от тока фокусирующей системы можно использовать для определения геометрических характеристик канала проплавления.

3. Разработанная математическая модель может быть использована при построении алгоритмов оперативного управления глубиной сварного шва с помощью варьирования значения тока фокусировки при электронно-лучевой сварке пучком с осциллирующим фокусом.

Библиографические ссылки

1. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
2. Вопросы управления формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке / В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев, В. П. Литвинов, О. В. Розанов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. под ред. проф. Г. П. Белякова. – 2008. – Вып. 2. – С. 148–152.
3. Olszewska K., Friedel K. Control of the electron beam active zone position in electron beam welding processes. Vacuum 2004, 74, 29–43.
4. Акоюнц К. С., Емченко-Рыбка А. В. Прибор для стабилизации фокусировки луча при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1983. – № 5. – С. 62–64.
5. Double closed-loop control of the focal point position in laser beam welding / X. Zhang [et al.] // Meas. Sci. Technol. – 2003. – No. 14. – P. 1938–1943.
6. Беленький В. Я. О колебательном перемещении области соударения электронного луча с металлом в канале проплавления при электронно-лучевой сварке // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 1. – С. 47–49.
7. Трушников Д. Н., Беленький В. Я. Экспериментальное исследование формирования сигнала вторичного тока в плазме по параметрам при электронно-лучевой сварке с осцилляцией пучка // Сварочное производство. – 2012. – № 10. – С. 9–13.
8. Устройство управления фокусировкой и глубиной проплавления по собственному рентгеновскому излучению при ЭЛС с модуляцией уровня фокусировки / В. Я. Браверман, Д. А. Скурихин, С. Г. Баякин, В. Ф. Шабанов, В. В. Башенко // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 16–19.
9. Браверман В. Я., Белозерцев В. С. Зависимость рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при различной степени фокусировки в процессе электронно-лучевой сварки // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. под ред. проф. Г. П. Белякова. – 2010. – Вып. 2. – С. 121–125.
10. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д. Н. Трушников, В. М. Язовских, В. Я. Беленький, Л. Н. Кротов // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.

11. Plasma Charge Current for Controlling and Monitoring Electron Beam Welding with Beam Oscillation / D. Trushnikov, V. Belenkiy, V. Shchavlev, A. Piskunov, A. Abdullin, G. Mladenov // *Sensors*. – 2012. – Vol. 12(12). – P. 17433–17445.

12. Моделирование динамического поведения сварочной ванны при лазерной и гибридной сварке с глубоким проплавлением / Г. А. Туричин, Е. А. Валдайцева, Е. Ю. Поздеева, Е. В. Земляков, А. В. Гуменюк // *Автоматическая сварка*. – 2008. – № 7. – С. 15–19.

13. Математические модели процессов изменения рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при электронно-лучевой сварке / В. Я. Браверман,

В. С. Белозерцев, Н. Н. Горяшин, А. Т. Лелеков // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева*: сб. науч. тр. под ред. проф. Г. П. Белякова. – 2009. – Вып. 2. – С. 247–251.

14. Трушников Д. Н., Бельский В. Я. Вторично-эмиссионный сигнал из зоны электронно-лучевой сварки и его связь с геометрическими параметрами сварного шва // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2011. – № 2. – С. 13–17.

15. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко, В. С. Белозерцев, Н. Н. Горяшин, А. Т. Лелеков; под ред. В. Д. Лаптенка. – Красноярск: САА, 2000. – 234 с.

V. E. Shchavlev, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University

D. N. Trushnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University

A. A. Yuzhakov, DSc in Engineering, Professor, Perm National Research Polytechnic University

Mathematical Model of Sensor of Secondary Current in Plasma to Control the Electric Beam Focusing

The article presents the analysis of spectral characteristics of the collector sensor of secondary radiation in plasma generated in the zone of the electron beam contact with the metal during the electron beam welding. The mathematical model of the sensor is developed and analyzed.

Key words: electron-beam welding, mathematical model, Fourier series, secondary-emission signal current in plasma.

УДК 621.833.6

А. В. Овсянников, Глазовский инженерно-экономический институт (филиал) Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

Л. П. Перминов, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧ ТИПА $K-H-V$ С РОЛИКОВЫМИ МЕХАНИЗМАМИ СНЯТИЯ ДВИЖЕНИЯ С САТЕЛЛИТА

Приведены результаты экспериментального исследования КПД планетарных передач типа $K-H-V$ с цилиндрическими и качающимися роликами механизма снятия движения с сателлита.

Ключевые слова: планетарная передача, внутреннее зацепление, роликосый механизм снятия движения с сателлита, испытательный стенд, КПД.

В настоящее время к редукторам общемашиностроительного применения предъявляются высокие требования, которые заключаются как в обеспечении хороших массогабаритных характеристик, больших передаточных отношений, так и в получении высокого коэффициента полезного действия.

Указанным требованиям достаточно полно удовлетворяют планетарные передачи с внутренним зацеплением колес и небольшой разницей в числах их зубьев [1, 2]. Наиболее простой и эффективной из них является передача типа $K-H-V$ с механизмом снятия движения, выполненным в виде дисков с отверстиями, в которых установлены ролики [3].

Одна из таких конструкций с цилиндрическими роликами и двумя параллельно расположенными сателлитами приведена на рис. 1. Передача содержит эксцентриковое водило, два одинаковых сателлита с внешними зубьями, неподвижное центральное колесо с внутренними зубьями и механизм снятия дви-

жения с сателлита, состоящий из жестко связанных с выходным валом дисков и роликов, расположенных в отверстиях сателлитов и дисков. В процессе работы планетарного механизма ролики не скользят, а перекатываются по цилиндрическим поверхностям сопрягаемых с ними деталей, чем обеспечивается высокий КПД.

В данной конструкции планетарной передачи могут быть использованы ролики особой конфигурации (рис. 2) [4]. Такие ролики в процессе ее работы не обкатываются по поверхностям цилиндрических отверстий, а совершают качательные движения. Использование качающихся роликов позволяет равномерно распределить нагрузку между сателлитами. Самоустановка сателлитов компенсирует неточности изготовления передачи и повышает ее нагрузочную способность.

Для экспериментального исследования планетарных передач типа $K-H-V$ с роликосыми механизмами снятия движения с сателлита были разработаны